

В. Л. ХАВИН, канд. техн. наук, зав.кафедрой, НТУ «ХПИ»;
А. М. ГРИНЕНКО, магистр, НТУ «ХПИ»;
Л. В. АВТОНОМОВА, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
А. В. СТЕПУК, канд.физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ИЗНОСА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РЕЗАНИИ НА ОСНОВЕ МКЭ

Представлен пошаговый алгоритм расчета износа контактных поверхностей режущего клина, базирующийся на решении связанной термоупругопластической контактной задачи взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемого материала. Численно алгоритм реализован с помощью пакета ABAQUS/Explicit совместно с оригинальной подпрограммой расчета скорости износа по зависимости Усуи.

Ключевые слова: математическое моделирование, накопление износа, контактная поверхность, пластические деформации, конечный элемент, режущий инструмент.

1 Описание проблемы. Процессы обработки материалов резанием широко применяются в машиностроительной промышленности и отличаются большим многообразием в зависимости от геометрии заготовки и детали, обрабатываемых и инструментальных материалов, конструкции и геометрии режущего инструмента, режимов обработки и т.п. При всем многообразии видов лезвийной обработки всегда решается задача разработки оптимального технологического процесса, что обеспечивает максимальную его эффективность при удовлетворении необходимых требований к качеству изделия.

Непосредственные экспериментальные исследования связи входных и выходных параметров процессов лезвийной обработки дают необходимую информацию для формирования оптимальных технологических операций, но представляют собой трудоемкий и очень длительный процесс для каждой пары инструмент – обрабатываемый материал.

Особую трудность представляют исследования, посвященные изучению процесса износа режущего клина лезвийных инструментов, так как процесс износа имеет физически сложный и комплексный характер. Вследствие этого интенсивное развитие получили аналитические и численные методы прогнозирующего моделирования процессов обработки резанием, позволяющие с достаточной степенью точности определить усилия и распределение температуры на поверхностях контакта инструмента с обрабатываемым материалом и, как следствие, обеспечить возможность теоретического прогнозирования накопления износа и определения периода стойкости инструмента.

Экспериментальные исследования для пары режущий клин – обрабатываемый материал длятся годами и полученные характеристики износа позво-

ляют достоверно прогнозировать стойкость инструмента в сравнительно узком диапазоне скоростей резания и скоростей подач.

Имитационное численное моделирование процесса стружкообразования, например, при помощи метода конечных элементов, уже сегодня позволяет достаточно корректно расчетным путем определить распределение скорости относительного проскальзывания, напряжения и температуру на контактной поверхности режущий клин – обрабатываемый материал и на их основе успешно прогнозировать развитие процесса износа режущего клина.

Однако, подавляющее число работ, [1-3], посвященных расчету накопления износа и оценки периода стойкости инструмента основывается на начальной геометрии инструмента и интегральных выходных параметрах процесса, таких как силы и скорость резания, подача и средняя температура резания, что заметно уменьшает точность получаемых результатов и требует экспериментальной коррекции. Используемые модели износа учитывают, как правило, лишь один механизм износа, не учитывая его мультифизическую связанную структуру, а также комплексное влияние на скорость износа локальных параметров состояния в точках контактной поверхности.

2 Постановка задачи. Цель настоящей работы – реализация пошагового алгоритма накопления износа режущего инструмента, базирующегося на численном определении локальных параметров состояния в контакте.

В процессе резания поверхность лезвия режущего инструмента, контактируя сдвигающимся обрабатываемым материалом, находится под действием высоких сдвиговых усилий, давлений и температур, что приводит к мультифизическому износу контактной поверхности за счет комплексного механизма, включающего следующие составляющие:

- абразивный износ;
- адгезионный износ;
- окислительный износ;
- диффузионный износ;
- усталостный износ.

Интенсивность износа зависит от длительности процесса резания, скорости резания, подачи, ширины среза, геометрии режущей части инструмента, физико-механических свойств материала и др.

В зависимости от условий резания, инструментального и обрабатываемого материала интенсивный износ имеет место на передней, задней или по передней и задней контактными поверхностями одновременно.

В задачах прогнозирующего моделирования износа в процессе резания используются следующие модели:

1. Комбинированная модель Усуи [4] для износа на передней поверхности инструмента учитывает адгезию и диффузию:

$$\dot{W} = A \sigma_n v_c e^{(-B/T)}, \quad (1)$$

где A, B – const, σ_n – контактные давления, v_c – скорость скольжения стружки.

2. Такаяяма и Мюрата [5] предложили уравнение для учета абразивного и диффузионного износа по задней поверхности режущего клина:

$$\dot{W} = Av + Be^{(-E/RT)}, \quad (2)$$

где \dot{W} – скорость объемного износа, $A, B, R = \text{const}$, E – энергия активации, v – скорость относительного скольжения на контактной поверхности, T – температура, °C.

3. Модель, основанная на уравнении диффузии Аррениуса, была предложена в работе [6] для расчета диффузионного износа:

$$\dot{W} = Ae^{(-B/T)}, \quad (3)$$

В режущем клине наблюдается две зоны износа : износ задней поверхности, вызывающий увеличение условного радиуса закругления острия, и износ по передней поверхности, вызывающий появление лунки (кратера) износа на передней поверхности режущего клина (рис. 1).

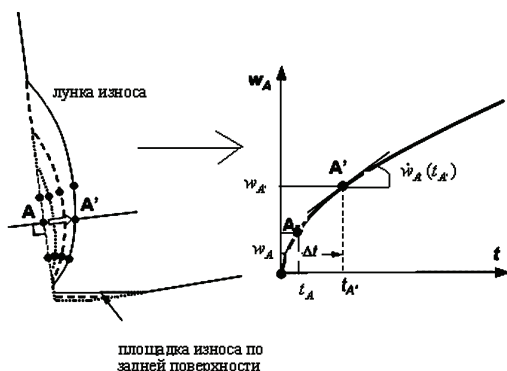


Рисунок 1 – Схема развития износа инструмента

Комбинация абразивного, адгезионного и диффузионного механизмов износа играет определяющую роль для всех процессов обработки резанием, а иные механизмы износа играют второстепенную роль для большинства известных инструментальных материалов. В отдельных случаях существенную роль играет также износ за счет окисления. Вклад каждого механизма износа зависит от условий резания, геометрии инструмента и свойств обрабатываемого и инструментального материала.

В настоящей работе рассматривается алгоритм численной оценки накопления износа режущего инструмента с помощью численного моделирования процесса стружкообразования и связанности физических процессов в зоне резания.

Схема пошагового алгоритма расчета накопления износа с учетом изменения геометрии режущего клина и соответствующего изменения параметров состояния в контактирующих точках представлена на рис. 2.

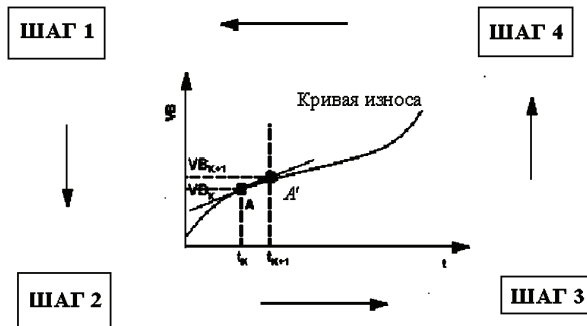


Рисунок 2 – Алгоритм расчета накопления износа режущего клина.

Шаг 1 – расчет механических параметров состояния на контактной поверхности при t_k (точка A на кривой износа). Шаг 2 – расчет температурного поля на поверхности контакта. Шаг 3 – расчет скорости объемного износа и величины накопленного линейного износа за время $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ (точка B на кривой износа). Шаг 4 – формирование измененной за счет износа на k -том шаге геометрии режущего клина и начального поля параметров состояния)

На шаге 1 численно с помощью МКЭ-пакета решается термоупругопластическая задача контактного взаимодействия режущего клина с обрабатываемым материалом и определяется напряженно-деформированное состояние зоны резания, контактные усилия и скорости проскальзывания для точек контактной поверхности в начальный момент времени $t_k = 0$.

На втором шаге решается нестационарная задача теплопроводности за период времени $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ с учетом тепловыделения за счет работы пластического деформирования и работы сил трения и определяется распределение температурного поля на контактных поверхностях.

Третий шаг состоит в расчете по соответствующим параметрам состояния скорости объемного износа в узловых точках сетки контактных конечных элементов режущего клина и вычислении величины линейного износа инструмента по нормали к контактной поверхности.

На четвертом шаге производится корректировка геометрии режущей части инструмента и осуществляется переход к шагу 1.

Данный алгоритм позволяет численно получить кривую износа для точек контактных поверхностей инструмента и на каждом временном шаге t_k определить величину лунки износа по передней поверхности контакта и площади износа по задней поверхности режущего клина (рис. 2).

3 Численное моделирование. Численно данный алгоритм реализован с помощью пакета ABAQUS/Explicit совместно с оригинальной подпрограммой расчета скорости объемного износа по зависимости (1) и перестроения геометрии режущего клина на каждом вычислительном цикле.

В качестве примера рассматривался процесс ортогонального резания

сплава 20NiCrMo5 режущим лезвием из твердого сплава – карбида вольфрама. Рассматривалась двумерная термомеханическая связанная контактная задача плоской деформации для термоупругого режущего клина и термоупругопластического обрабатываемого материала, в котором возникают большие пластические деформации. Задача решается в постановке связанной формулировки Лагранжа-Эйлера [7]. Соотношения, определяющие пластическое состояние материала, представлялись зависимостью напряжений пластического течения от деформаций, скоростей деформаций и температуры в форме модели Джонсона-Кука:

$$\sigma_Y = (A + B\bar{\varepsilon}_p^n)(1 + \ln \dot{\varepsilon}_p^*)[1 - (T^*)^m]; \quad \dot{\varepsilon}_p^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_{p0}; \quad T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0), \quad (4)$$

где $\bar{\varepsilon}_p, \dot{\varepsilon}_p$ – эквивалентные пластические деформации и скорости, T_m – температура плавления материала, A, B, C, n, m – const.

Модель трения на контактной поверхности задавалась законом Кулона с коэффициентом $\mu = 0,4$ и в виде постоянных касательных напряжений в области контакта, которые превышают предел текучести материала на сдвиг:

$$\tau_n = \min(\mu\sigma_n, \tau_y), \quad (5)$$

где τ_n, σ_n – контактные сдвиговые усилия и давления.

Физико-механические характеристики обрабатываемого материала и режущего клина приведены в табл. 1, входные геометрия режущего клина и параметры процесса резания – в табл. 2, константы уравнения Джонсона – Кука – в табл. 3.

Таблица 1 – Физические константы

Характеристика	Материал (20NiCrMo5)	Инструмент (карбид вольфрама)
Плотность (кг/см ³)	7,8	15
Козф. Пуассона	0,3	0,3
Модуль упругости (ГПа)	210	800
Козф. теплопроводности (Вт/м °С)	47,7	46
Теплоемкость (Дж/кг °С)	556	203
Козф. линейного расширения (1/°С)	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2 – Геометрия режущего клина и параметры процесса резания

Параметр	Значение
Передний угол α	6°
Задний угол γ	6°
Скорость резания v , мм/с	5000
Толщина среза, мм	0,1
Начальный радиус закругления острия, мм	0,1

Численные расчеты осуществлялись на основе конечноэлементной модели, использовался связанный термомеханический билинейный конечный элемент CPE4RT из библиотеки пакета ABAQUS/Explicit, число элементов

для обрабатываемого материала – 3005, для клина – 280 элементов.

В таблице для иллюстрации процесса накопления износа даны значения приращения объемного износа ($\text{мм}^3/\text{с}$) передней поверхности режущего клина за два шага расчета для двенадцати узловых контактных узлов.

Таблица 3 – Константы уравнения Джонсона-Кука

Материал	20NiCrMo5
A , (МПа)	490
B , (МПа)	600
n	0,21
C	0,015
m	0,6
T	1900

Таблица 4 – Значения приращения объемного износа

Шаг $i = 1$	Шаг $i = 2$
$dW_1 := 0.001391152616$	$dW_{11} := 0.001448998216$
$dW_2 := 0.001391152616$	$dW_{12} := 0.002322929720$
$dW_3 := 0.001391152616$	$dW_{13} := 0.002417026770$
$dW_4 := 0.001929976669$	$dW_{14} := 0.0003714715329$
$dW_5 := 0.001929976669$	$dW_{15} := 0.001389331364$
$dW_6 := 0.001929976669$	$dW_{16} := 0.001972776311$
$dW_7 := 0.001929976669$	$dW_{17} := 0.001972776311$
$dW_8 := 0.001391152616$	$dW_{18} := 0.001389331364$
$dW_9 := 0.003037513019$	$dW_{19} := 0.001536734764$
$dW_{10} := 0.004910070027$	$dW_{110} := 0.001474891633$
$dW_{11} := 0.005290381033$	$dW_{111} := 0.0006189142035$
$dW_{17} := 0.001928865539$	$dW_{112} := 0.001845001970$

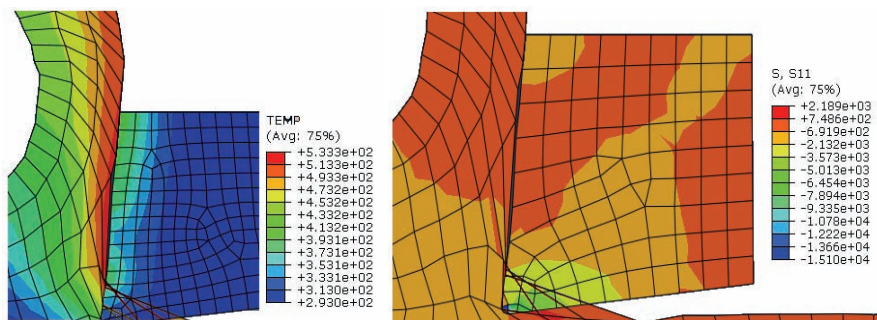


Рисунок 3 – Состояние зоны резания в момент времени $t_2 = 60$ с

На рис. 3 представлено распределение температуры и интенсивности напряжений (кг/см^2) для материала и режущего клина с величиной износа, полученного за отрезок времени $t_2 = 60$ с.

На рис. 4 и рис. 5 приведено изменение формы режущего клина соответствующей расчетному накоплению износа к моменту времени работы инструмента $t_2 = 60$ с и $t_k = 210$ с.

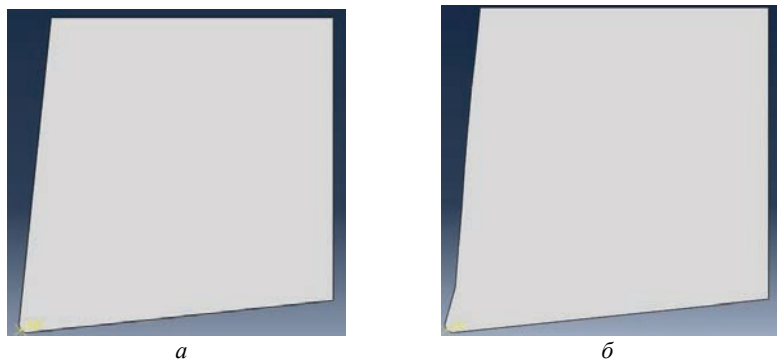


Рисунок 4 – Геометрия реза: *a* – в начальный момент времени; *б* – в момент времени $t_2 = 60$ с.

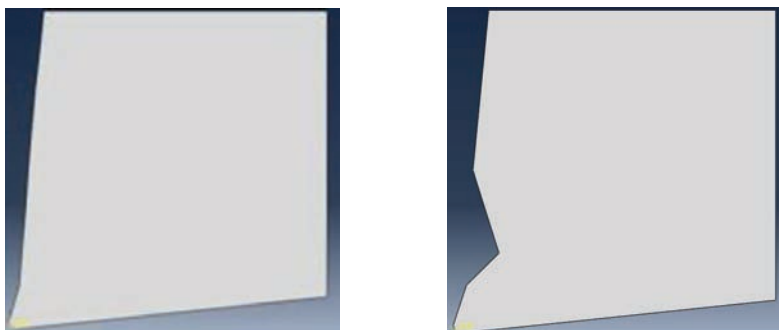


Рисунок 5 – Изменения геометрии режущего клина за отрезок времени от $t_2 = 60$ с до $t_k = 210$ с.

Выводы. В работе представлен один из возможных подходов к расчету накопления износа режущего инструмента на основе численного имитационного моделирования процесса стружкообразования при помощи МКЭ. Локальные параметры состояния в контакте определялись путем численного решения связанной термоупругопластической контактной задачи для термоупругого режущего клина и упруго-пластически деформируемого обрабатываемого материала.

Пошаговый алгоритм может быть использован для прогноза накопления

износа по передней и задней контактных поверхностях режущего клина. Для пары материалов сплав 20NiCrMo5 – карбид вольфрама приведена оценка накопления износа инструмента с применением модели Усуи для скорости износа. Предлагаемый подход позволяет получить кривые накопления износа в широком диапазоне параметров обработки резанием, обрабатываемых и инструментальных материалов.

Список литературы: 1. *Oxley P.L.* Calculating the shear angle in orthogonal metal cutting from fundamental stress, strain, strain-rate properties of the workpiece material / *P.L. Oxley, M.J.M. Welsh* // Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Tool Design and Research Conference. – 1963. – V.4. – P. 73-86. 2. *Ceretti E.* Application of 2D FEM to chip formation in orthogonal cutting / *E. Ceretti, P.Falbohermer, W.-T. Wu, T. Altan* // Journal Material. 3. *Shalta M.* Tool-workpiece interface in orthogonal cutting application of FEM modelling / *M. Shalta, Y.-C. Yen, T. Altan* // Transaction of the NAMR/SME. – 200. – V. XXVII. – P. 173-178. 4. *Usui E.* Analytical prediction of three dimensional cutting process, part 3: cutting temperature and crater wear of carbide tool / *E.Usui, T.Shirakahi, T.Kitagawa* // Journal of Engineering for Industry. – 1978. – V. 100, № 5. – P. 233-239. 5. *Takeyama H.* Basic investigations on tool wear. Transactions of the ASME / *H.Takeyama, T.Murata* // Journal Engineering for Industry. – 1963. – V. 85. – P. 33-38. 6. *Mathew P.* Use of predicted cutting temperature in determining tool performance / *P.Mathew* // International Journal Machining Tools Manufacturing, chinability of Materials. – 2007. – V. 2, № 3. 7. *Yen Y.C.* Estimation of tool wear of carbide tool in orthogonal cutting using FEM simulation / *Y.C. Yen, J. Sohnet, H. Weule, J. Schmidt, T. Altan* // Proceedings of the CIRP International Workshop on Modelling of Machining Operations, West Lafayette, USA. – 2002. – P. 149-160.

Поступила в редакцию 25.09.2013

УДК 539

Моделирование накопления износа при высокоскоростном резании на основе МКЭ / В. Л. Хавин, А. М. Гриненко, Л. В. Автономова, А. В. Степук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 58 (1031). – С. 184-191. – Бібліогр.: 7 назв.

Представлений покроковий алгоритм розрахунку зносу контактних поверхонь ріжучого клину, що базується на рішенні зв'язаної контактної термоупругопластичної задачі взаємодії ріжучого інструменту і оброблюваного матеріалу. Чисельно алгоритм реалізований за допомогою пакету Abaqus/explicit спільно з оригінальною підпрограмою розрахунку швидкості зносу по залежності Усуї.

Ключові слова: математичне моделювання, накопичення зносу, контактна поверхня, пластичні деформації, кінцевий елемент, ріжучий інструмент

Presented step-by-step algorithm for calculating the wear of contact surfaces of the cutting wedge. It is based on the solution of the bound thermal elasticoplastic contact problem for cutting tool and material interaction. The numerical algorithm is implemented with the ABAQUS/ Explicit software and the original routine using the Usui wear rate.

Key words: mathematical modeling, wear accumulation, contact surface, plastic deformation, finite element, cutting tool.